



# Étude expérimentale de l'évolution par érosion interne des matériaux d'ouvrage hydraulique en terre

Fateh Bendahmane, Didier Marot, Alain Alexis, Pierre Thomas

## ► To cite this version:

Fateh Bendahmane, Didier Marot, Alain Alexis, Pierre Thomas. Étude expérimentale de l'évolution par érosion interne des matériaux d'ouvrage hydraulique en terre. 2004. hal-00354855

**HAL Id: hal-00354855**

**<https://hal.science/hal-00354855>**

Preprint submitted on 21 Jan 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# ETUDE EXPERIMENTALE DE L'EVOLUTION PAR EROSION INTERNE DES MATERIAUX D'OUVRAGE HYDRAULIQUE EN TERRE.

**Fateh BENDAHMANE , Didier MAROT, Alain ALEXIS et Pierre THOMAS**

*GeM, UMR CNRS 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, site de l'I.U.T. de Saint-Nazaire, BP 420, 44606 Saint-Nazaire Cedex, France*

---

*RESUME. Sous l'action d'un écoulement interne, un ouvrage hydraulique en terre (digue, levée ou barrage) peut être sujet à un arrachement et une migration de ses grains. Cette migration provoque une modification de la granulométrie et de la porosité du sol qui induit une variation des caractéristiques hydrauliques et mécaniques. A plus ou moins long terme, ces modifications peuvent engendrer une perte d'étanchéité, un glissement, une surverse voire une rupture de l'ouvrage.*

*L'apparition de brèches dans certains ouvrages récents souligne la nécessité d'améliorer la compréhension des phénomènes mis en jeu, de leurs interactions et de leur incidence sur le comportement mécanique du matériau.*

*Dans le cadre de cette problématique, nous proposons un nouveau montage expérimental spécifique qui permet de solliciter hydrauliquement et mécaniquement des échantillons de sols cohésifs reconstitués. Les premiers essais réalisés permettent de valider notre démarche expérimentale et précisent la dynamique de l'érosion interne.*

*MOTS-CLÉS : érosion interne, montage expérimental, sols cohésifs.*

---

*ABSTRACT. Under the action of an internal flow, some particles of the hydraulic earthwork (dyke, levee or dam) can migrate. This migration causes a modification of granulometry and porosity of the soil, which creates a variation of the hydraulic and mechanical characteristics. These modifications can induce a leakage, a sliding, an overtopping and even a rupture of the work.*

*The appearance of breaches in some recent structures needs to improve comprehension of the phenomena, their interactions and their incidence on the mechanical behavior.*

*In this purpose, we propose the design of a new specific device to hydraulically and mechanically solicit samples of reconstituted cohesive soil. The first tests carried out make it possible to validate our experimental design and specify the dynamic aspects of internal erosion.*

*KEYWORDS : internal erosion, experimental device, cohesive soils.*

---

## 1. INTRODUCTION

En présence d'eau, les ouvrages en terre peuvent subir des dommages irréversibles suivant trois mécanismes principaux : le glissement, la submersion et l'érosion interne. FOSTER *et al.*, 2000 précisent que sur les 11 192 barrages en terre observés, 136 d'entre eux ont subi des accidents dont 5,5% par glissement, 46 % par érosion interne et 48 % par surverse. L'érosion interne est donc un mécanisme majeur responsable des instabilités constatées in-situ.

L'érosion interne provient de la migration, sous l'action d'un écoulement, de certains grains constitutifs de l'ouvrage. Cette migration est mal connue à cause de sa complexité et de sa difficulté à être détectée. Elle engendre une modification des caractéristiques hydrauliques et mécaniques du matériau constituant l'ouvrage. La perméabilité du matériau peut être considérablement modifiée ce qui peut provoquer une perte d'étanchéité ou des surpressions interstitielles. L'arrachage de certains grains porte préjudice à la stabilité structurelle du matériau et peut même conduire à la rupture de l'ouvrage.

Les mécanismes responsables de l'érosion interne sont complexes et dépendent de plusieurs paramètres qui peuvent être couplés. Même en laboratoire, l'identification du mécanisme peut être problématique, c'est ainsi que les interprétations de MONNET, 1998 et de SKEMPTON et BROGAN, 1994 divergent à propos d'une même campagne d'essais. D'une manière générale, la terminologie employée pour caractériser l'érosion interne est variable et dépend des disciplines et des chercheurs. Selon la terminologie la plus courante, nous définissons les deux principaux phénomènes :

**Le renard** : ce phénomène provoque un arrachage régressif des particules de l'aval du sol vers un milieu extérieur et en progressant vers l'amont, jusqu'à la formation d'un conduit continu. La granulométrie du sol varie donc avec une augmentation de la perméabilité. Ce phénomène de renard est difficilement détectable et évolue très rapidement, ce qui laisse peu de temps pour agir. Généralement l'apparition du phénomène de renard dans les sols cohésifs est favorisée par des défauts de perméabilité.

**La suffusion** : ce phénomène se traduit par une redistribution interne des particules fines dans le sol. La granulométrie globale du sol ne change pas, par contre la perméabilité diminue. Cette redistribution des particules provoque une surpression localisée en aval de l'écoulement et peut engendrer un glissement de sol. Généralement l'évolution du phénomène de suffusion est très lente, ce qui permet de la détecter et d'agir en conséquence.

Dans la littérature, plusieurs critères ont été proposés pour estimer l'initiation et le développement de l'érosion interne. Les approches sont multiples et reposent essentiellement sur l'étude granulométrique des matériaux ou sur l'évaluation du gradient hydraulique critique d'érosion.

**Critère granulométrique.** En considérant la capacité des gros grains à s'opposer à l'érosion des grains plus petits, KENNEY *et* LAU., 1985 ont élaboré une méthode basée sur l'allure de la courbe granulométrique de matériaux granulaires ou à faible proportion de fines. Cette méthode a également été validée pour les écoulements ascendants par SKEMPTON et BROGAN., 1994, puis complétée par MONNET, 1998.

Pour réduire les risques de renard, les ouvrages hydrauliques en terre comportent fréquemment un filtre généralement placé sous le parement aval. Ce filtre peut être en géotextile ou constitué d'une

couche d'un autre sol. Ce filtre doit être bien adapté sinon sa présence risque d'aggraver les risques de glissement par l'apparition de surpressions interstitielles lors du colmatage du filtre. Ce constat a conduit plusieurs auteurs à rechercher le filtre idéal, LAFLEUR, 1999, montrent bien les différents phénomènes observés selon l'épaisseur et la taille de l'ouverture des pores du filtre. L'auteur compare l'ouverture des pores du filtre avec un diamètre des grains déterminé selon l'allure de la courbe granulométrique et le coefficient d'uniformité. Si l'ouverture du filtre est suffisamment petite, le phénomène de suffusion se produira avec colmatage du filtre. Une grande ouverture provoquera un renard, par contre une ouverture intermédiaire pourra s'accompagner d'une stabilisation de l'érosion en forme de voûte dite zone d'autofiltration. Plusieurs méthodes empiriques permettent de déterminer l'ouverture du filtre. Nous pouvons notamment citer la méthode de LAFLEUR, 1999, pour les sols pulvérulents et celle de MLYNAREK *et* VERMEERSCH., 1999 pour les sols cohérents, celle-ci étant basée sur la granulométrie, l'indice de plasticité et le pourcentage de dispersion (norme ASTM D4221).

**Critère hydraulique.** Pour caractériser l'initiation de l'érosion interne, plusieurs chercheurs ont donné des expressions du gradient hydraulique critique. Certaines formulations dépendent étroitement de la configuration étudiée et sont donc difficilement généralisables. Pour les sols cohérents, KHILAR *et al.*, 1985, ont exprimé le seuil du gradient critique d'érosion en fonction de la contrainte de cisaillement hydraulique ( $\tau_c$ ), de la perméabilité intrinsèque et de la porosité. La contrainte de cisaillement hydraulique ( $\tau_c$ ) définie par ARULANANDAN *et* PERRY., 1983 est un coefficient empirique qui dépend de la minéralogie de l'argile et de la nature du fluide interstitiel. Pour les sols pulvérulents DEN ADEL *et al.*, 1988 (cité par BLAIS, 2003), ont proposé une expression simplifiée du gradient hydraulique critique en fonction de l'allure de la courbe granulométrique. Les fortes incertitudes de ces expressions amènent les ingénieurs à prendre des valeurs élevées du coefficient de sécurité sur le gradient hydraulique qui peut dans certains cas atteindre 15.

A partir du principe de l'essai au « Pinhole test », VARDOULAKIS *et* PAPAMICHOS., 2001, modélisent le développement d'un renard à l'aide des paramètres suivants : porosité initiale, perméabilité, viscosité, pression de confinement, gradient hydraulique et de deux coefficients empiriques.

Les critères actuels d'érosion interne ne prennent pas en considération le couplage des effets hydrauliques et mécaniques ainsi que les interactions des paramètres prépondérants. Le nombre important de paramètres qui influent sur les différents phénomènes et leur caractère évolutif soulignent la nécessité de prendre des précautions expérimentales adaptées.

## 2. DESCRIPTIF DU MONTAGE EXPERIMENTAL

### 2.1. PRINCIPE

La plupart des auteurs (notamment LAFLEUR, 1989 et 1999, REDDI *et* BONALA., 1997, AYADAT *et al.*, 1998, TOMLINSON *et* VAID., 2000, TAROG, 2000, REDDI *et al.*, 2000), ont mené leurs essais à l'aide d'un perméamètre à paroi rigide. Les avantages de ce type de matériel sont la simplicité de mise en œuvre et d'utilisation ainsi que le faible coût du matériel. Les inconvénients proviennent de la nature du confinement qui est uni-axial et de la présence d'écoulements parasites entre l'échantillon et la paroi. Pour réduire les écoulements parasites KENNEY *et* LAU., 1985, ont

introduit une membrane caoutchouc entre la paroi rigide et l'échantillon qui a été compacté dans cette cellule. La cellule d'essai doit donc avoir préférentiellement une paroi souple pour d'une part s'affranchir des écoulements parasites entre l'échantillon et une paroi rigide, et d'autre part pour pouvoir contrôler le confinement de l'échantillon.

LAFLEUR, 1989, TOMLINSON *et* VAID., 2000, HAMEIRI *et* FANNIN., 2002 ont testé des échantillons composés de billes de verre. Ce type de matériau permet d'obtenir une très bonne répétitivité des essais, mais il ne peut représenter un sol cohérent et ne permet pas de tenir compte de l'angularité des grains. La facilité d'emploi des billes de verre laisse toutefois entrevoir la possibilité de réaliser des essais de compréhension phénoménologique. L'utilisation d'échantillons naturels pose le problème de la généralisation des résultats et de la répétitivité d'essais réalisés sur des échantillons par nature hétérogènes et particuliers. La reconstitution d'échantillon utilisée notamment par REDDI *et* BONALA., 1997, TAROG, 2000 apparaît être un bon moyen pour représenter un sol cohérent naturel tout en s'assurant une répétitivité satisfaisante lors de la préparation des échantillons qui doivent être préalablement homogénéisés par malaxage mécanique puis consolidés (BENDAHDMANE, 2002). Notons toutefois que l'utilisation de particules argileuses nécessite un système adapté de collecte de l'effluent pour éviter le dépôt de particules dans le circuit.

ARULANANDAN *et* PERRY., 1983, REDDI *et al.*, 2000 ont souligné l'importance de la nature du fluide interstitiel et de la minéralogie des matériaux testés. Il convient donc de contrôler ces deux paramètres et de réguler la température du fluide injecté afin de contrôler sa viscosité.

Pour éviter la boullance et ainsi identifier plus sûrement l'action de la suffusion et du renard, les échantillons doivent être soumis à un écoulement descendant. Les essais réalisés par BENDAHDMANE, 2002 indiquent que l'accroissement du gradient hydraulique s'accompagne d'une accélération de l'évolution de la perméabilité. A l'inverse, l'augmentation de la pression de confinement des échantillons se traduit par un ralentissement de cette même évolution perméométrique. Par ailleurs TOMLINSON *et* VAID., 2000 ont mis en évidence l'incidence de la vitesse d'augmentation du gradient de pression.

La taille de l'ouverture des pores du filtre et l'épaisseur de celui-ci sont manifestement déterminantes pour la variabilité des phénomènes (LAFLEUR, 1989, 1999). Cela requiert donc la possibilité de tester différentes ouvertures et épaisseurs de filtre.

D'après KENNEY *et* LAU., 1985, LAFLEUR, 1989, BARAKAT, 1991, TOMLINSON *et* VAID., 2000, un sol pulvérulent est constitué d'une structure primaire et d'une structure secondaire. La structure primaire est constituée de grains qui assurent la résistance du sol. L'arrachage de ces grains modifie la résistance du sol et peut provoquer un effondrement. Par contre la structure secondaire est constituée de grains libres qui ne participent pas à la résistance et qui peuvent se déplacer facilement dans le sol, sous l'action d'une sollicitation mécanique (vibration) ou d'une sollicitation hydraulique (écoulement de fluide). BARAKAT, 1991 précise que le départ des grains par le phénomène de suffusion n'influence pas la résistance des sols. Toutefois AYADAT *et al.*, 1998, ont noté que le phénomène de suffusion provoque une modification du potentiel d'affaissement pour les sols cohésifs et que l'augmentation du gradient hydraulique accentue la suffusion. Cette évolution du comportement mécanique induite par la migration doit être quantifiée. D'où la nécessité de mettre au point une

expérimentation qui autorise la caractérisation du comportement mécanique après ou pendant l'écoulement, sans déconfiner l'échantillon.

La durée des essais pouvant être importante, il est souhaitable d'automatiser toutes les opérations expérimentales.

## 2.2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

Notre montage permet l'étude de l'initiation et du développement de l'érosion interne pour des échantillons sablo-argileux. Ce montage, qui est placé dans une pièce à température et hygrométrie contrôlées, se compose de trois cellules triaxiales modifiées. Ces cellules sont modifiées pour optimiser l'injection d'un fluide interstitiel et la récolte de l'effluent. L'injection est réalisée à l'aide d'un contrôleur de pression et de volume (GDS) et la tête d'injection comporte un lit de billes de verre pour améliorer la diffusion tout en réduisant les pertes de charge. L'embase des cellules est en forme d'entonnoir pour éviter le colmatage ou le dépôt de particules dans le système. Cette embase permet l'utilisation de différents filtres qui peuvent être rigides ou en géotextile. Pour éviter toute perturbation non contrôlée des échantillons, la saturation, la consolidation et les essais hydrauliques et mécaniques des échantillons sont réalisés au sein de la même cellule et sans déconfinement. Le suivi de l'effluent est réalisé par voie optique, sur le principe de la transparence du fluide, et par pesée de la masse de l'effluent. La réalisation d'essais sur des sols cohérents est généralement de durée importante. L'ensemble du montage est donc connecté à un ordinateur via un multiplexeur afin d'automatiser l'acquisition des données et le pilotage des essais.

## 3. ESSAIS ET ANALYSE

### 3.1. ESSAIS DE CONFRONTATION ET DE VALIDATION

Afin de vérifier la qualité des mesures réalisées avec notre montage et de le valider, nous avons reproduit un essai de KENNEY *et al.*, 1992. Cet essai consiste à tester des échantillons composés de sable et de bentonite suivant un rapport massique bentonite/sable de 8%.

L'appareillage utilisé par KENNEY *et al.*, 1992 est un perméamètre à paroi rigide, la consolidation axiale s'élève à 70 kPa, le gradient hydraulique est de 15 m/m et le fluide utilisé est l'eau distillée. Les dimensions de l'échantillon sont : section 50 mm<sup>2</sup>, hauteur comprise entre 25 et 30 mm. La perméabilité hydraulique ainsi mesurée est comprise entre  $2,1 \cdot 10^{-10}$  et  $2,2 \cdot 10^{-10}$  m/s.

Nous avons réalisé trois échantillons suivant le même pourcentage de bentonite et en prenant soin de reproduire la granulométrie du sable. La perméabilité mesurée avec notre appareillage sur ces échantillons de 50 mm de hauteur et de 50 mm de diamètre est comprise entre  $2,3 \cdot 10^{-10}$  m/s et  $3,0 \cdot 10^{-10}$  m/s. La bonne répétitivité des essais et la valeur mesurée extrêmement voisine de celle de KENNEY *et al* (1992) permettent de valider notre procédure expérimentale.

### 3.2. PREMIERE ETUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'EROSION

Dans le but vérifier la capacité du banc expérimental à caractériser l'initiation et le développement de l'érosion interne, nous réalisons un essai d'écoulement sur un échantillon composé de kaolinite et de sable avec un rapport massique kaolinite/sable de 11% et de poids volumique sec 17 kN/m<sup>3</sup> (hauteur 100 mm et diamètre 50 mm). La pression de confinement est fixée à 100kPa, l'injection

s'effectue à débit constant,  $15,3 \text{ mm}^3/\text{s}$  (figure 4). La taille de l'ouverture des pores du filtre est de 4 mm pour autoriser la migration de tous les grains.

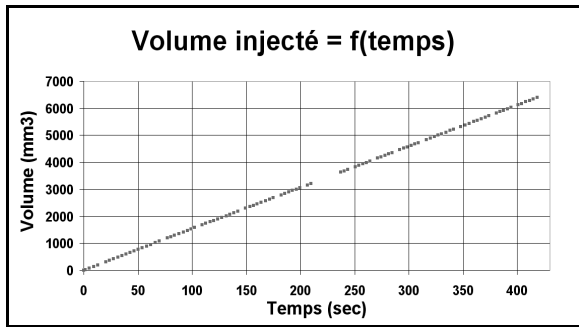


Figure 4 : Evolution du volume d'eau injecté.

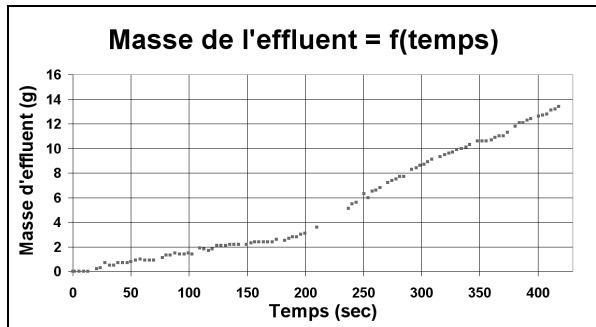


Figure 5 : Evolution de la masse de l'effluent.

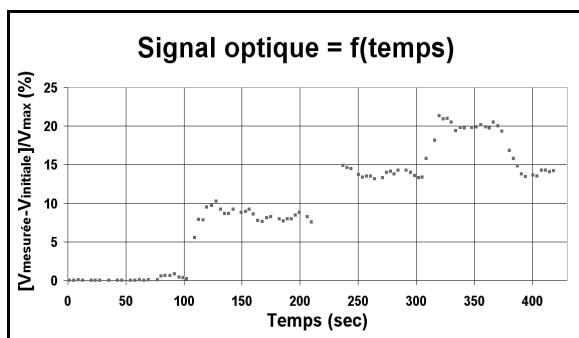


Figure 6 : Evolution du signal optique.

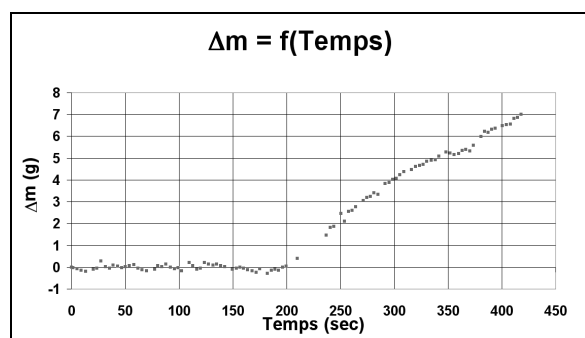


Figure 7 : Evolution de la différence entre les masses injectée et récoltée.

L'évolution de l'érosion peut être décomposée en trois phases.

Au cours de la première phase (jusqu'à  $t = 100 \text{ s}$ ) l'érosion n'a pas débuté, la valeur de la masse récoltée atteint 1,5 g (figure 5) et est équivalente au volume d'eau injecté qui est de  $1527 \text{ mm}^3$  soit 1,527 g.

La deuxième phase débute lors de la variation brutale du signal optique (figure 6) à  $t = 100 \text{ s}$ . Cette variation nous indique la présence d'un arrachage et d'une migration de particules. Par contre l'écart entre la masse récoltée et la masse injectée (figure 7) n'est pas significatif. Il y a donc un arrachage et une migration de petite particules en suspension (kaolinite).

La troisième phase ( $t > 210 \text{ s}$ ) se caractérise par des variations importantes du signal optique qui soulignent la discontinuité du flux de grains érodés (figure 6) et par une stabilisation du débit massique récolté ( $4,72 \cdot 10^{-2} \text{ g/s}$ ) bien supérieur au débit massique injecté ( $1,53 \cdot 10^{-2} \text{ g/s}$ ). Au bout de 400 secondes d'essai, la masse de matériau érodé atteint 6,5 g (masse injectée 6,1 g ; masse récoltée 12,6 g). Les grains arrachés sont donc certainement de taille plus importante que lors de la précédente étape.

La figure 7 confirme l'arrachage des gros grains à partir de 210 s, par une brutale variation de l'évolution de la différence de masses injectée et récoltée. Donc l'érosion interne au sein de l'échantillon testé s'est initiée par l'arrachage et la migration d'une partie de la kaolinite. L'évolution structurale induite a alors permis l'arrachage et la migration de grains de sable. L'essai s'est interrompu par l'effondrement de l'échantillon.

#### 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les mécanismes responsables de l'érosion interne sont multiples, évolutifs et dépendent de plusieurs paramètres. Face à cette complexité, les critères d'initiation et de développement de l'érosion interne présents dans la littérature sont diverses et souvent étroitement dépendants de l'ouvrage étudié.

La rupture d'ouvrages récents souligne les insuffisances des critères actuels pour estimer le déclenchement, le développement de l'érosion interne et le comportement mécanique. Dès lors, la conception et la réalisation d'un montage permettant d'effectuer une campagne d'essais paramétriques sur ces thèmes apparaît nécessaire.

Ce banc expérimental permet tout d'abord de saturer et de consolider des échantillons composés de sable et d'argile. Les cellules triaxiales utilisées ont été modifiées afin de réaliser un écoulement (statique ou dynamique) au cœur des échantillons. La possibilité de changer l'épaisseur et la taille d'ouverture des pores du filtre autorise la génération des phénomènes de renard et de suffusion. La réalisation d'essais de durée importante est rendue possible, grâce à l'automatisation du pilotage et de l'acquisition des données et par ailleurs, l'utilisation simultanée de trois cellules nous permet de réduire la durée de la campagne d'essais. Grâce à l'analyse optique instantanée de l'effluent, nous pouvons estimer le gradient critique d'érosion interne. L'étude du développement de l'érosion interne est effectuée par confrontation des mesures du débit volumique d'injection et du débit massique d'effluent.

Les premiers essais réalisés ont permis d'une part de valider la procédure expérimentale et d'autre part de décomposer la dynamique de l'érosion interne : la migration de certaines particules argileuses précède l'arrachage des grains de sable. A l'aide de ce montage nous pourrions réaliser une campagne d'essais paramétriques susceptibles de caractériser l'initiation et le développement de la suffusion et du renard en prenant en compte le couplage hydraulique-mécanique. L'importance du nombre de paramètres nécessitera l'élaboration d'un plan d'expériences pour optimiser le nombre d'essais, quantifier l'incidence des différents paramètres et constituer une base de données nécessaire à la modélisation de l'érosion interne.

#### 5. REFERENCES.

- AFNOR (NF P 94-074) (1994) « Essais à l'appareil triaxial de révolution » Association française de normalisation, p.339-374.
- ARULANANDAN K., PERRY E.B. (1983) «Erosion in relation to filter design criteria in earth dams» *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 109, N°5, p. 682-696.
- AYADAT T., BELOUAHRI B., AIT AMMAR R.. (1998) «La migration des particules fines comme approche d'explication du mécanisme de l'effondrement» *Revue Française de géotechnique*, n°83, p.73-81.
- BARAKAT B. (1991) «Instabilité aux écoulements des milieux granulaires, aspects morphologiques et probabilistes» Thèse Ecole Centrale de Paris, p 135.
- BENDAHDANE F. (2002) «Influence de l'écoulement sur la résistance des sols: étude expérimentale préliminaire» DEA Université de Nantes, p.62.
- BLAIS J.P., (2003) « Revue bibliographique sur l'érosion interne » *rapport Irex* 179 p.
- FOSTER M., FELL R., SPANNAGLE M. (2000) «A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping» *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, p. 1025-1061.



- FOSTER M., FELL R., SPANNAGLE M. (2000) «The statistics of embankment dam failures and accidents» *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, p.1000-1024.
- FRY J.J., DEGOUTTE G., GOUBET A. (1997) «L'érosion interne : typologie, détection et réparation» *Barrages & Réservoirs*, n°6, p.126.
- HAMEIRI A., FANNIN R.J. (2002) «A cyclic gradient ratio test device » *Geotechnical testing journal*, Vol. 25, n°3, p. 266-276.
- KENNEY T.C., LAU D. (1985) «Internal stability of granular filters» *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, p. 215-225.
- KENNEY T.C., VAN VEEN W.A., SWALLOW M.A., SUNGAILA M.A. (1992) « hydraulic conductivity of compacted-sand mixtures» *Canadian Geotechnical. Journal*, Vol. 29, p. 364-374.
- KHILAR K.C., FOGLER H.S., GRAY D.H. (1985) «Model for piping-plugging in earthen structures» *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, n°7, p.833-846.
- LAFLEUR J. (1999) «Selection of géotextiles to filter broadly graded cohesionless soils» *Geotextiles and Geomembranes*, vol.17, p. 299-312.
- LAFLEUR J., MLYNAREK J., ROLLIN A.L. (1989) «Filtration of broadly graded cohesionless soils» *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, n°12, p. 1747-1768.
- MLYNAREK J., VERMEERSCH O. (1999) «Filter criteria for geotextile materials in soil filtration and leachate collection systems» *Proceedings Sardinia99, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 4-8 October 1999*.
- MONNET A. (1998) «Boulance, érosion interne, renard. Les instabilités sous écoulement» *Revue Française de géotechnique*, n° 82, p.3-10.
- REDDI L.N., BONALA M.V.S. (1997) «Critical shear stress and its relationship with cohesion for sand-Kaolinite mixtures» *Canadian Geotechnical. Journal*, Vol. 34, p. 26-33,
- REDDI L.N., LEE I., BONALA M.V.S. (2000) «Comparison of internal and surface erosion using flow pump test on a sand-kaolinite mixture» *Geotechnical testing journal*, Vol. 23, n°1, p. 116-122,
- SKEMPTON A.W., BROGAN J.M. (1994) «Experiments on piping in sandy gravels» *Géotechnique*, vol.44, n°3, p. 440-460.
- TAROG I. (2000) «Perméabilité et érosion interne des mélanges sable-argile, contribution théorique et expérimentale» *Thèse Ecole Centrale de Lyon*, p.297.
- TOMLINSON S.S., VAID Y.P. (2000) «Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion» *Canadian Geotechnical. Journal*, Vol. 37, p. 1-13.
- VARDOULAKIS I., PAPAMICHOS E. (2001) «A continuum theory for erosion in granular media» *Cermes21, Actes de la journées scientifique internationale, Cermes 21*, p. 41-60.